УДК 921/793

А.Ф.ИЛЬЮЩЕНКО, О.В.РОМАН, А.И.ШЕВЦОВ

ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ НЕРАВНОВЕСНЫХ АМОРФИЗИРОВАННЫХ СТРУКТУР КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ В СИСТЕМЕ "НАПЫЛЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ - ПОДЛОЖКА"

Выполнены исследованияи показано влияние температурного режима в системе "напыленные частицы - подложка" на формирование элементов неравновесных аморфизированных структур композиционных плазменных покрытий Ni80Cr20+12,5%MoS_2(CaF_2)+55%TiC.
Ключевые слова: *напыленные частицы, подложка, аморфизация.*

Введение. Используемые в настоящее время методы нанесения защитных покрытий и упрочнения рабочих поверхностей деталей машин имеют свои преимущественные области применения. Сложившиеся школы газотермического, детонационного, наплавочного, плазменного и других видов обработки поверхностей с успехом доказывают жизнеспособность таких технологий [1-5]. Плазменное нанесение покрытий на воздухе помимо всего прочего рассматривается в качестве способа формирования аморфных, нанокристаллических, сверхпроводящих, биологически инертных и других специальных металлокерамических, керамических и т.п. композиционных покрытий с высокой когезионной прочностью, твердостью, изностойкостью.
Цель исследований – изучение процессов и разработка научных основ формирования неравновесных структур плазменно-напыленных покрытий.

Для достижения поставленной цели изучено влияние температурного режима в системе "напыленные частицы - подложка" на формирование элементов неравновесных аморфизированных структур композиционных плазменных покрытий NiCr+карбидная фаза. Интерес обусловлен тем, что температурный режим во многом определяет перспективы сверхбыстрого охлаждения жидкофазной частицы на подложке со скоростью 10^5-10^6 град/с, являющейся, как правило, пороговой для эффективной аморфизации покрытий. При этом также проведена активация тепловых полей на подложке, т.е. ускорение охлаждения жидкофазных частиц осуществлялось регулированием толщины наносимого композиционного покрытия с изменением затрудняющего теплоотвод порового пространства. Осуществлялось также дополнительное охлаждение подложки струей сжатого воздуха.

Методика исследования. При обосновании технологических приемов проанализированы возможности увеличения количества соударяющихся с подложкой композиционных частиц порошка в жидкофазном состоянии. К таким возможностям относятся повышение мощности дуги плазмотрона, применение специальной насадки плазмотрона конструкции Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, наложение на плазменный поток с частицами порошка ультразвуковых колебаний от газоструйных стержневых излучателей (рис.1), согласно известным режимам напыления композиций Ni80Cr20+12,5%MoS_2(CaF_2)+55%TiC, оптимизированным по коэффициенту использования распыляемого порошка, 22,5 кВт [6].

Для аморфизации структуры покрытий предусмотрено повышение мощности дуги плазмотрона от 22,5 до 33,75 кВт.

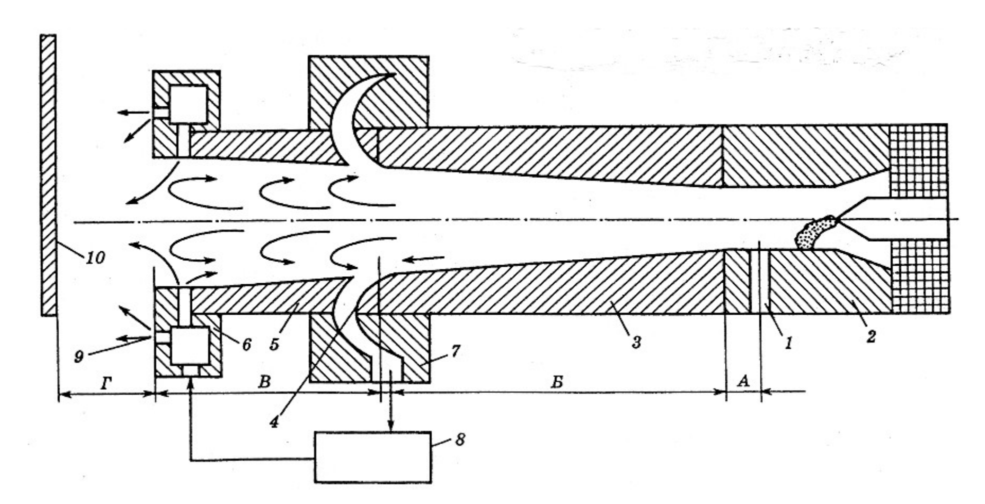


Рис.1. Схема напыления порошка на подложку плазмотроном с насадкой: 1 – ввод порошка; 2 – плазмотрон с соплом №1; 3 – 6 – соответственно сопла №2 - №5 насадки; 7 – холодильник; 8 - компрессор; 9 – возвратный газ; 10 – подложка; А – зона нагрева порошка в плазмотроне; Б – зона нагрева порошка в насадке; В – зона экстрагирования плазменного потока; Г – зона формирования покрытия

Согласно [6] температура плазменного потока на выходе из насадки (при мощности плазмотрона $N_{общ}$=24 кВт и расходе плазмообразующих газов Ar=35 л/мин, N_2=10 л/мин) на длине l=25 мм снижается с 1800 до 330 К. Температура плазменного потока при традиционном способе напыления в воздушной среде на этих же дистанциях снижается до 1300 К. Остаточное тепловое воздействие плазменной струи на подложку не превышает 4% от теплового воздействия напыляемых частиц и в 50 раз меньше теплового потока плазменной струи без применения насадки. Температура внутренних стенок второго сопла достигает 1800 К. В этом случае внутри насадки зона нагрева напыляемых частиц увеличивается до 100 мм, и в результате при одинаковой мощности плазмотрона к.п.д. нагрева частиц повышается в 2 раза.

Перечисленные преимущества плазмотрона с насадкой способствуют возрастанию эффективности нагрева и увеличению количества соударяющихся с подложкой композиционных частиц порошка в жидкофазном состоянии. Одновременно снижается нагрев подложки, что ускоряет теплоотвод и охлаждение на ней жидкофазных частиц. Все это является положительным факторам аморфизации формируемого покрытия.

Что касается регулирования температурного режима путем изменения тепловых полей на подложке, то оно предусмотрено за счет варьирования толщины наносимого композиционного покрытия и дополнительного охлаждения подложки струей сжатого воздуха. Опыт такого охлаждения известен в сварочном производстве.

При варьировании температурного режима в качестве критериев оценки степени аморфизации покрытий приняты возрастание усредненной

микротвердости и уширение линий рентгенограмм [111], [200] нанесенного материала. Правомерность второго критерия объясняется уравнением для определения размера области когерентного рассеяния $D_{эфф}$, характеризующего ближний порядок атомов изучаемого материала [6]. Известно, что переход к аморфизированной структуре происходит по мере уменьшения $D_{эфф}$. В соответствии с указанным уравнением это имеет место при увеличении ширины передних рентгеновских линий [111], [200], фиксирующих разупорядочение структуры.

Режимы плазменного напыления композиционных покрытий с варьированием температурного режима в системе "напыленные частицы - подложка" приведены в таблице.

Распыляемый материал	Режимы напыления					
	Ток дуги плазмо-трона, А	Напряжение дуги, В	Расход плазмообразующего газа, л/мин		Расход распыляемого порошка, усл. един.	Дистанция напыления, мм
			аргона	водорода		
Ni80Cr20 + +12,5%MoS_2(CaF_2)+ +55%TiC	300 350 400 450	75	50	15	15	120

Экспериментальные цилиндрические образцы длиной 12 мм и диаметром 10 мм получали по следующей технологии:

- одну из торцевых поверхностей стальных образцов подвергали струйно-абразивной обработке зернами электрокорунда (шероховатость подготовленной поверхности должна быть Ra 12,5-25 мкм);

- на подготовленную поверхность плазменным напылением на установке УПУ–3Д наносили покрытия NiCr + 12,5%MoS_2(CaF_2) + 55%TiC. Режимы напыления приведены в таблице.

Исследование влияния нагрева частиц в плазменном потоке на формирование элементов неравновесных аморфизированных структур композиционных плазменных покрытий. Результаты исследований, полученные по разработанной методике, приведены на рис.2. Согласно рис.2,а при повышении мощности дуги плазмотрона до 30,0 кВт происходит практически монотонное увеличение микротвердости напыленных покрытий. Это объясняется более интенсивным прогревом распыляемых частиц в осевой зоне плазменной струи.

Возрастает количество соударяющихся с подложкой композиционных частиц порошка в жидкофазном состоянии. Создаются благоприятные начальные условия для сверхбыстрого охлаждения жидкофазных частиц на подложке с аморфизацией структуры формируемого покрытия и увеличением его микротвердости. Вместе с тем дальнейшее повышение мощности дуги плазмотрона до 33,75 кВт вызывает снижение степени аморфизации и уровня микротвердости покрытия, что, очевидно, связано с возрастающим перегревом и эффектом разбрызгивания соударяющихся с подложкой частиц. В случае разбрызгивания вторичные частицы с пониженной температурой и приближенной формой тел вращения практически не деформируются и затвердевают на подложке при скоростях охлаждения, которые на два порядка меньше, чем при деформации и затвердевании в виде дисков [7-9].

Это вызывает снижение степени аморфизации и уровня микротвердости покрытия. Наряду со снижением степени аморфизации при разбрызгивании возможны потери композиционного материала с нежелательным уменьшением коэффициента использования распыляемого порошка.

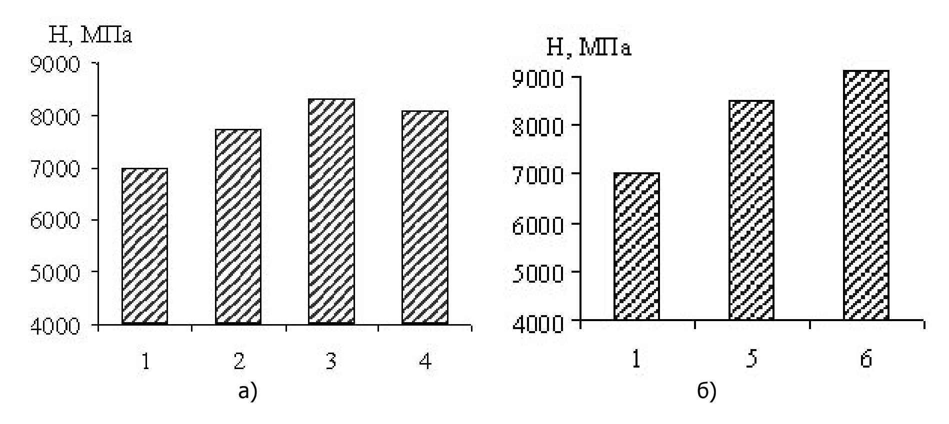


Рис.2. Средние значения микротвердости напыленных покрытий Ni80Cr20+12,5%MoS_2+55%TiC в зависимости от нагрева частиц в плазменном потоке: а – без наложения ультразвука; б – с наложением ультразвука на плазменный поток; 1, 2, 3, 4 – мощности дуги плазмотрона соответственно 22,5; 26,25; 30,00 и 33,75 кВт; 5, 6 – наложение ультразвука при мощностях дуги плазмотрона 26,25 и 30,00 кВт

Анализируя результаты исследования аморфизации при нагреве частиц в плазменном потоке с наложением ультразвука, необходимо отметить следующее. Согласно рис.2,б наложение ультразвука на зону высокотемпературного ядра потока оказывает большее влияние на активизацию процесса аморфизации в сравнении с повышением мощности дуги плазмотрона. Это достигается за счет важного преимущества наложения ультразвука, который позволяет расширить и турбулизировать высокотемпературную плазменную струю с обеспечением более равномерного и улучшенного прогревания основной массы распыляемого композиционного порошка. Уменьшается градиент температуры частиц порошка в поперечном сечении плазменной струи. Увеличивается количество частиц с температурой, обеспечивающей их охлаждение на подложке от жидкофазного состояния, что является условием аморфизации покрытия. Как видно из рис.2,б, при использовании оптимальной мощности дуги плазмотрона с наложением ультразвука достигается максимальный уровень аморфизации покрытия.

Исследование влияния тепловых полей на подложке на аморфизацию композиционных плазменных покрытий. В соответствии с разработанной методикой исследования изменений микротвердости и степени аморфизации напыленного материала проводились при варьировании толщины наносимого композиционного покрытия. Осуществлялось также дополнительное охлаждение подложки струей сжатого воздуха. Результаты исследований представлены на рис.3 (в расчет не принимались замеры микротвердости, соответствующие переходной зоне от покрытия к подложке).

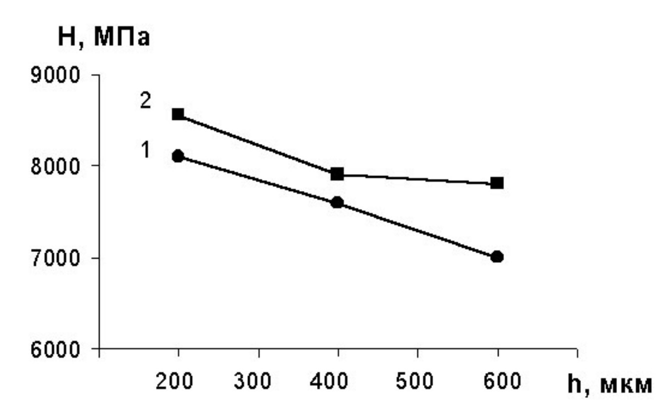


Рис.3. Средние значения микротвердости напыленных покрытий Ni80Cr20+12,5%MoS_2+55%TiC в зависимости от их толщины при мощности дуги плазмотрона 22,5 кВт: 1 – без охлаждения подложки; 2 – с охлаждением подложки струей сжатого воздуха

Как видно из рис.5, при увеличении толщины покрытия уровень его аморфизации уменьшается, что объясняется постепенным возрастанием объема порового пространства наносимой композиции. Затрудняется теплоотвод от жидкофазных частиц в глубь покрытия с уменьшением их скорости охлаждения и возможности аморфизации. Наряду с толщиной покрытия значимым является активизирующее аморфизацию дополнительное воздействие на подложку струей сжатого воздуха. Очевидно, что в данном случае бóльшая доля тепла, поступающая с напыляемыми частицами, рассеивается в окружающее пространство.

Имеет место минимальный нагрев формируемого покрытия и подложки (<325 К), способствующий ускоренному охлаждению частиц. При этом менее критическими для получения аморфной структуры являются увеличение толщины покрытия и снижение коэффициента теплопроводности напыляемого материала (из-за наличия пористости между частицами, формирующими покрытие), а также размеры подложки и ее теплофизические свойства. Это подтверждается экспериментальной кривой 2 на рис.3, для которой характерно меньшее снижение уровня аморфизации при увеличении толщины покрытия в сравнении с зависимостью 1, полученной по результатам экспериментов без охлаждения подложки струей сжатого воздуха. Меньшее снижение уровня аморфизации при увеличении толщины покрытия является важным обстоятельством для нанесения износостойких композиций Ni80Cr20 + 12,5%MoS_2(CaF_2) + 55%TiC. Практика газотермического напыления свидетельствует о том, что толщина износостойких покрытий, как правило, составляет не менее 0,5-0,6 мм.

Практические результаты. С учетом вышеизложенных результатов исследований нанесены плазменные композиционные покрытия Ni80Cr20+ +12,5%MoS_2(CaF_2)+55%TiC, напыленные по оптимизированной технологии, способствующей аморфизации структуры данных композиций. При плазменном напылении по предлагаемой технологии в сравнении с известными режимами имеет место уширение передних линий [111] и [200] рентгенограммы нанесенного материала, что свидетельствует об увеличении степени аморфизации его структуры. Что касается основных фаз покрытия, то наблюдается бóльшее уширение линий TiC в сравнении с Ni, т.е. аморфиза-

ция и разупорядочение структуры карбидов титана происходит более активно в сравнении с твердым раствором на основе никеля.

Анализ полученных рентгенограмм показывает хорошее согласование с результатами замеров микротвердости покрытий (см.рис.2, 3). В частности, уширение линий рентгенограммы и аморфизация структуры коррелируют с возрастанием когезионной прочности и микротвердости аморфизированного материала.

Выводы. Разработана методика исследований, согласно которой для регулирования температурного режима изучено влияние нагрева частиц в плазменном потоке и тепловых полей на подложке в системе "напыленные частицы - подложка" с формированием элементов неравновесных аморфизированных структур композиционных плазменных покрытий NiCr + карбидная фаза.

Для эффективного прогревания наряду с наложением ультразвука целесообразно увеличение мощности дуги плазмотрона до 30 кВт. При наложении ультразвука и указанной мощности усредненная микротвердость напыленных покрытий NiCr+карбидная фаза повышается от 7000 МПа (для известных режимов плазменного напыления) до 9100 МПа, что коррелирует с возрастанием когезионной прочности и уровня аморфизации покрытий.

Практика газотермического напыления свидетельствует о том, что толщина износостойких покрытий, как правило, составляет не менее 0,5-0,6 мм. С учетом результатов исследований нанесены плазменные покрытия Ni80Cr20+12,5%MoS_2(CaF_2)+55%TiC, напыленные по оптимизированной технологии, способствующей аморфизации структуры нанесенных композиций.

Библиографический список

1. *Красниченко Л.В.* Поверхностное упрочнение деталей машин по кривым износа и эпюрам деформации / Л.В.Красниченко, В.А. Шадчинев / РИСХМ. – Ростов-н/Д, 1973. – 97 с.
2. *Дорожкин Н.Н.* Получение порошковых изделий и покрытий из материалов на железной основе / Н.Н.Дорожкин, Г.Г.Горанский, В.Г.Люлько и др. /БелНИИНТИ и ТЭИ Госплана БССР. – Минск, 1990. – 89 с.
3. *Овчинников В.И.* Применение взрывных технологий в упрочнении поверхности и нанесении защитных слоев на конструкционных сталях / В.И.Овчинников, О.В.Роман, Е.А.Дорошкевич и др. // Порошковая металлургия. Вып.30. – Минск, 2007. – С.238-244.
4. *Кудинов В.В.* Нанесение покрытий плазмой / В.В.Кудинов, П.Ю.Пекшев, В.Е.Белащенко и др. – М.: Наука, 1990. – 406 с.
5. Ilyuschenko A.Ph, Shevtsov A.I. et al.. Investigation and optimization of plasma spraying of hard-lubricating wear-resistant coatings // Proc. 3-rd Inter. Conf. "Industrial engineering–new challenges to SME". – Tallinn, 2002. – P. 150-153.
6. *Кудинов В.В.* Анализ распределения скоростей и удельной энтальпии частиц по радиусу пятна напыления при использовании конической насадки / В.В.Кудинов, В.И.Калита, Д.И.Комлев и др. // ФХОМ. – 1992. – №5. – С. 82-85.

7. *Борисов Ю.Я.* Газоструйные излучатели звука и их применение для интенсификации технологических процессов / Ю.Я.Борисов. – М., 1980.
8. *Верещагин М.Н.* Исследование особенностей структурообразования износостойких аморфизированных покрытий самофлюсующихся сплавов на основе железа / М.Н.Верещагин, Г.Г.Горанский // Трение и износ. – 1997. – Т. 18. – № 6. – С. 827-831.
9. *Чернышова Т.А.* Влияние сверхбыстрой кристаллизации на структуру и свойства мартенситно-стареющих сталей / Т.А.Чернышова, Т.В.Люлькина, В.И.Калита // МИТОМ. – 1988. – №1. – С. 32-39.

Материал поступил в редакцию 11.03.08.

A. ILYUSHCHENKO, O.ROMAN, A. SHEVTSOV

FORMATION OF ELEMENTS OF NONEQUILIBRIUM AMORPHISATED STRUCTURES OF COMPOSITE PLASMA COATINGS IN SYSTEM "SPRAYED PARTICLES- SUBSTRATE"

Researches of influence of a temperature mode in system "sprayed particles - substrate " on formation of elements of nonequilibrium amorphizated structures of composite plasma coatings Ni80Cr20+12,5%MoS_2(CaF_2)+55%TiC are carried out. Increase of microhardness of spayed material was criterion of a amorphization degree. At research of influence of heating of particles various technological techniques of effective warming up as important condition of amorphization are analyzed. Influence on amorphization of thickness of plasma coatings and additional cooling of a substrate by a jet of compressed air are considered.

ИЛЬЮЩЕНКО Александр Федорович (р.1956), директор Белорусского концерна порошковой металлургии НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор. Лауреат Госпремии Белоруссии, кавалер медали Франциска Скарины.
Область научных интересов – материаловедение, новые материалы и плазменные технологии, синтез композиционных материалов, химико-термическая обработка металлов и сплавов с покрытиями.
Изобретатель СССР, автор более 380 научных работ и изобретений, в том числе 10 монографий, 17 авторских свидетельств и 11 патентов.

РОМАН Олег Владиславович (р.1926), доктор технических наук, профессор, академик НАН Белоруссии, один из основателей Белорусского концерна порошковой металлургии НАН.
Известный специалист в области порошковой металлургии, материаловедения, новых материалов и взрывных технологий для синтеза композиционных материалов.
Автор более 400 научных работ, авторских свидетельств и патентов.

Шевцов Александр Иванович (р.1950), заведующий сектором отдела плазменных композиционных покрытий Белорусского концерна порошковой металлургии НАН, кандидат технических наук.
Область научных интересов: порошковая металлургия, композиционные материалы и покрытия, моделирование процессов получения новых материалов.
Автор более 50 опубликованных работ.